

EXPERIENCIA DIDÁCTICA DE CALENTAMIENTO APROVECHANDO LA ENERGIA SOLAR

Enrique D. Albizzati y Germán H. Rossetti

Área de Operaciones Unitarias - Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral

Santiago del Estero 2654 – 3000 - Santa Fe – Argentina

Teléfono : 0342 4571160 - Email: albizzati@fiquis.unl.edu.ar

RESUMEN

Se presenta un trabajo práctico para estudiar la performance térmica de un colector solar que calienta aire. El equipo opera en estado no estacionario. Para analizar el comportamiento, durante la experiencia realizada se midieron la temperatura de entrada y salida del aire, la velocidad del aire, las temperaturas en varios puntos del lecho, y la radiación solar incidente. Luego se calcularon la energía útil, la eficiencia térmica y los parámetros característicos del colector solar (eficiencia óptica y coeficiente de pérdidas de calor). El trabajo práctico desarrollado permite a los estudiantes tomar contacto con herramientas fundamentales en Ingeniería, como balance de energía, fenómenos de transferencia de calor, modelado de equipos, y cálculo computacional. También debe destacarse que los estudiantes adquieren habilidades en el manejo de instrumentos de medición (termocuplas, piranómetro y anemómetro), y en el posterior tratamiento de los datos experimentales en una planilla de cálculo.

PALABRAS CLAVE: Educación - Ingeniería - Solar - Térmica.

INTRODUCCIÓN

El empleo de la radiación solar es hoy una realidad, ya que existe un amplio y confiable conjunto de tecnologías que posibilitan su aprovechamiento, especialmente como energía térmica a baja temperatura. Como ejemplo están los equipos usados en muchos países para el calentamiento de agua, secado de productos agrícolas, calefacción de ambientes y destilación de aguas salobres. Otra área de gran desarrollo es la conversión directa en electricidad mediante celdas fotovoltaicas. En otros campos, como la conversión indirecta en electricidad, el suministro de calor y frío en procesos industriales, y el de aplicaciones químicas, se están estudiando una serie de alternativas que seguramente permitirán incrementar el uso de la energía solar en el futuro (Duffie y Beckman, 1991; Kreider y Kreith, 1981; Ollis y Al-Ekabi, 1993; Rossetti y otros, 1998 ; Wilkins y Blake, 1994).

Asimismo, muchos temas básicos relacionados con la energía solar se han introducido en textos de enseñanza de la transferencia de calor (Incropera y De Witt, 1990; Mills, 1995). En ellos se trata el comportamiento de los materiales que se emplean en la construcción de equipos especialmente la variación de sus propiedades ópticas en el espectro solar. Se presenta la aplicación de las ecuaciones de balance térmico y se estudian los mecanismos de transferencia de calor en colectores solares que operan en estado estacionario y usan agua como fluido térmico. Sin embargo, debe observarse que como el recurso solar varía según la hora del día , la época del año y las condiciones climáticas del lugar, y que además existen dispositivos que poseen materiales para acumular la energía solar como energía térmica , los fenómenos de transferencia de energía en los equipos de aprovechamiento del sol son no estacionarios.

Aquí se presentan los principios teóricos y los resultados experimentales de un trabajo práctico para estudiar la performance térmica de un colector solar utilizado para el calentamiento de aire (Albizzati y Rossetti, 1998; Albizzati, 2000; Kudret Selçuk, 1977). La conversión de la radiación solar en energía térmica que se produce en el aparato depende de los tres mecanismos de transferencia de calor : conducción, convección y radiación. Una vez que los estudiantes de las carreras de Ingeniería conocen los principios básicos de la transferencia, el equipo solar es un ejemplo relevante donde es posible analizar cómo influyen sobre su comportamiento las propiedades térmicas, ópticas y mecánicas de los materiales que lo constituyen. Un adecuado tratamiento de los datos experimentales permite determinar los parámetros que caracterizan el comportamiento del colector (eficiencia óptica y coeficiente de pérdidas de calor), los que habitualmente se utilizan en el diseño y simulación de equipos solares.

DESCRIPCIÓN DEL COLECTOR

El equipo solar se muestra en la Figura 1. El colector posee una cubierta superior que es una lámina de nylon atravesada por la radiación solar, una estrecha cámara de aire, y otra cubierta inferior igual a la descripta. Luego tiene un lecho absorbente de 6 cm de espesor, conformado por virutas de acero de formas y tamaños diversos, sopleteadas con pintura negra mate y colocado sobre una malla metálica que actúa como soporte. En la parte inferior, el equipo está aislado

térmicamente con lana de vidrio, cuyo espesor es de 5 cm. Todos estos elementos están contenidos en una estructura de madera, material con el que está construida también el fondo del colector solar.

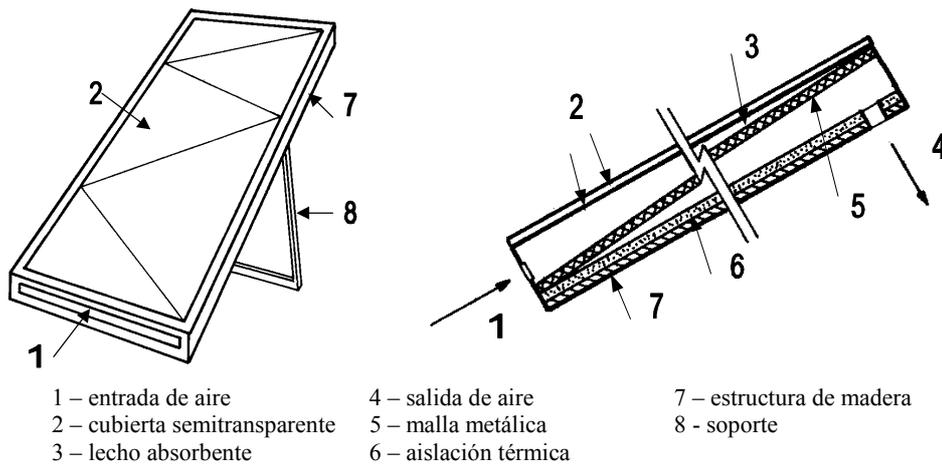


Figura 1. Esquema del colector solar.

Las dimensiones del equipo son 0,8 m de ancho, 1,8 m de largo y 0,2 m de alto, y el área bruta de colección de la energía solar es 1,44 m². El peso del total del colector es de 33 kg, mientras que el peso del lecho poroso es de unos 16 kg, y su porosidad es 97 %

Un ventilador-extractor ubicado en el conducto de salida impulsa la corriente de aire a través del lecho. El aire ingresa por una rendija ubicada en el frente del colector solar y egresa por un manifold compuesto por tres conductos de PVC situado en la parte posterior. El conducto único de salida construido con el mismo material plástico, tiene un radio de 2,5 cm.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El modelo teórico empleado para el estudio del colector solar que opera en estado no estacionario se elabora a través de balances de energía térmica en cada uno de los elementos que componen el colector solar y en la corriente de aire considerando la energía acumulada, la energía ganada y la energía perdida.

Para el lecho absorbente, se tienen en cuenta la acumulación, el intercambio convectivo de energía con el aire y las pérdidas de calor por radiación hacia la cubierta inferior. Se desprecia el calor transferido hacia las paredes laterales y el fondo del colector, debido a que el equipo está muy bien aislado. Siendo η_0 la fracción de la radiación solar incidente que es absorbida, resulta :

$$\text{Lecho absorbente: } M_b C_{pb} (d\langle T_b \rangle / dt) = \eta_0 I A_C - h_{r,1} (\langle T_b \rangle - T_{f,1}) A_C - h_c (\langle T_b \rangle - \langle T_a \rangle) A_C \quad (1)$$

En la ecuación de balance de energía térmica para el fluido se considera despreciable la energía que acumula al circular por el colector solar, por lo tanto la energía ganada por el aire es la energía intercambiada por convección desde el lecho absorbente.

$$\text{Aire: } 0 = h_c (\langle T_b \rangle - \langle T_a \rangle) A_C - m_a C_{pa} (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (2)$$

La cubierta inferior del colector recibe calor radiante desde el lecho, y transfiere energía también por radiación hacia la cubierta superior. Esta cubierta transparente también intercambia energía con el ambiente, produciéndose la transferencia simultáneamente a través de la convección y de la radiación.

$$\text{Cubierta inferior: } 0 = h_{r,1} (\langle T_b \rangle - T_{f,1}) A_C - h_{r,2} (T_{f,1} - T_{f,2}) A_C \quad (3)$$

$$\text{Cubierta superior: } 0 = h_{r,2} (T_{f,1} - T_{f,2}) A_C - (h_{r,e} + h_{c,e}) (T_{f,2} - T_e) A_C \quad (4)$$

Con las ecuaciones formuladas se encuentra la expresión siguiente:

$$1/U_C = (1/h_{r,1}) + (1/h_{r,2}) + [1/(h_{r,e} + h_{c,e})] \quad (5)$$

donde U_C es el coeficiente total de pérdidas de calor por el tope del colector solar.

En la Figura 2 está representado el circuito térmico correspondiente al colector. Se muestran las resistencias a la transferencia de energía entre el lecho y la cubierta inferior, entre la cubierta inferior y la cubierta superior, y entre esta última

y el ambiente que rodea al dispositivo. La energía útil en el colector está directamente relacionada con la elevación térmica de la corriente de aire presentada en la citada figura.

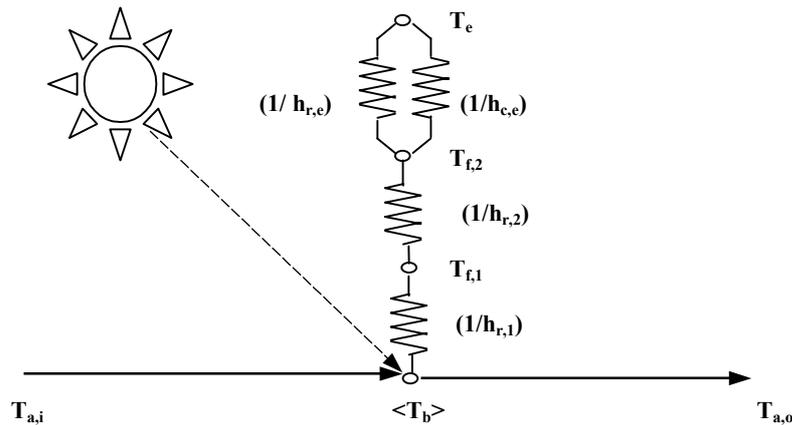


Figura 2. Circuito térmico del colector solar.

Combinando las ecuaciones (2)-(5), se obtiene la ecuación del balance de energía térmica que describe el comportamiento global del colector solar:

$$M_b C p_b (d\langle T_b \rangle / dt) = \eta_o I A_C - U_C (\langle T_b \rangle - T_e) A_C - m_a C p_a (T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (6)$$

PERFORMANCE TÉRMICA DEL COLECTOR

La eficiencia térmica del equipo (η) se define como el cociente entre la energía útil y la radiación solar incidente sobre el plano del colector:

$$\eta = m C (T_{a,o} - T_{a,i}) / I A_C \quad (7)$$

Por otra parte, se puede definir una variable auxiliar (η^*) que involucra la energía útil y la energía acumulada en el lecho, ambas divididas por la radiación solar recibida:

$$\eta^* = \eta + M_b C p_b (d\langle T_b \rangle / dt) / (I A_C) \quad (8)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones planteadas se escribe la siguiente expresión para η^* , que incluye los parámetros característicos del colector :

$$\eta^* = \eta_o - U_C [(\langle T_b \rangle - T_e) / I] \quad (9)$$

La ecuación (9) se emplea para hallar en forma experimental dichos parámetros. Los datos experimentales deben permitir la evaluación de η^* y $(\langle T_b \rangle - T_e) / I$, y dado que como éstas variables se encuentran alineadas, mediante una regresión lineal se determinan η_o (ordenada al origen) y U_C (valor absoluto de la pendiente).

MEDICIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para estudiar el comportamiento del dispositivo en función del tiempo y luego hallar los parámetros característicos del colector solar se realizaron experiencias donde se determinaron las temperaturas de entrada y salida del aire, la temperatura en varios puntos del lecho, la radiación solar incidente y la velocidad del aire en la salida.

En la medición de temperaturas se utilizaron termocuplas de Tipo J (hierro-constantan), y un indicador multicanal de alta precisión. En el lecho absorbente se colocaron cuatro termocuplas cada 0,60 m, a lo largo del colector solar. Con los datos se halló la temperatura media del lecho empleando funciones polinómicas de tercero y cuarto grado. Esta temperatura fue prácticamente igual a la temperatura media aritmética entre las medidas en los extremos del lecho.

La radiación solar global incidente sobre el colector solar fue medida con un piranómetro fotovoltaico previamente calibrado y leída con un milivoltímetro de alta precisión. Finalmente la velocidad del aire se determinó haciendo uso de un anemómetro de paletas con lectura digital y para calcular el caudal másico del aire se estimó la densidad a su temperatura de salida. Otros datos necesarios para realizar los cálculos, calor específico del aire y del lecho metálico, se estimaron de un manual (Perry y Green, 1999).

En las Figuras 3-5 se muestran los datos y los resultados obtenidos en una experiencia realizada por los estudiantes, con una duración de dos horas. Corresponde al día 14 de noviembre luego del mediodía en los alrededores del mediodía solar. El día fue de cielo sin nubes y de alta radiación, típico de fines de primavera en la región Centro Litoral de Argentina.

El colector solar se posicionó mirando al norte geográfico y con un ángulo de inclinación respecto a la horizontal igual a 20°. Estuvo durante media hora expuesto al sol, tiempo necesario para el montaje del instrumental, y luego se hizo circular el aire a una velocidad de 4,5 m/s en el conducto de salida.

El procesamiento de los datos medidos y recolectados se llevó a cabo computacionalmente, utilizando una planilla de cálculo. Las mediciones muestran en la Figura 3, que decrece en el transcurso de la experiencia la radiación solar, aumenta suavemente la temperatura de entrada del aire, y la temperatura de salida del aire disminuye en el tiempo. En relación con la temperatura media inicial del lecho fue relativamente alta, su tendencia general es decreciente, aunque se ha determinado un leve crecimiento, coincidente con un aumento en la temperatura de ingreso del aire.

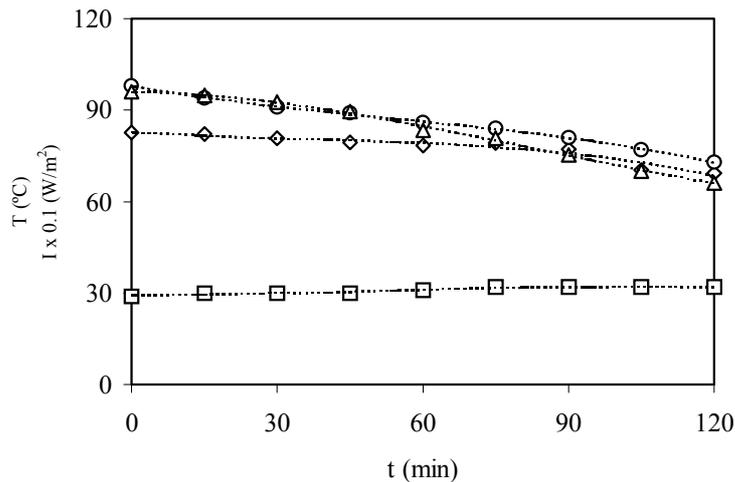


Figura 3. Temperaturas y radiación solar. Mediciones (O: $T_{o,a}$, Δ : $T_{i,a}$, Δ : I), cálculos (\diamond : $\langle T_b \rangle$), línea de tendencia(-----).

En la Figura 4 se representa la evolución en el tiempo de la energía útil, de la eficiencia térmica y de la variable arbitraria. En la experiencia la energía útil se reduce en un 42%, y las restantes variables decrecen, pero resulta más notable la reducción del valor de la variable arbitraria. Esto se debe a que aumenta en forma significativa la cantidad de calor aportado por el lecho absorbente a la corriente de aire circulante.

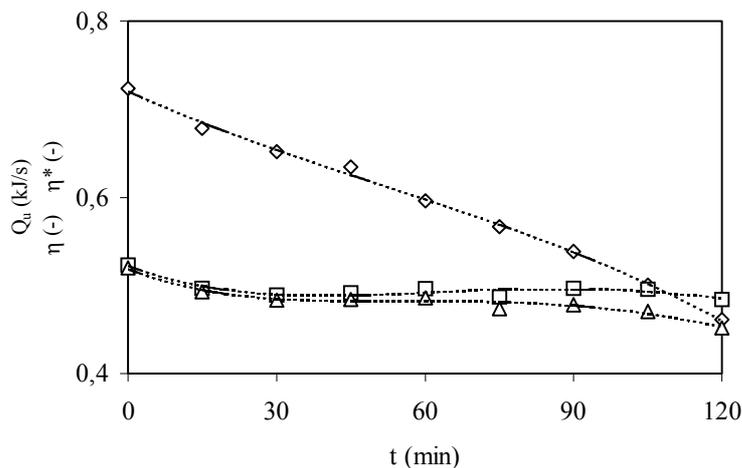


Figura 4. Energía útil ,eficiencia térmica y variable arbitraria. Cálculos (\diamond : Q_u , ∇ : η , Δ : η^*), línea de tendencia(-----).

La Figura 5 incluye los valores calculados de la variable arbitraria, y en la misma se ha trazado la recta que aproxima los valores de η^* y ϕ , con el fin de obtener los parámetros característicos del colector solar en operación.

El rendimiento óptico se estima que es aproximadamente igual al producto entre las transmitancias de las cubiertas y la absorbancia del material constituyente del lecho, por lo que su valor experimental es satisfactorio ($\eta_0 = 0,607$).

En relación con el coeficiente de pérdidas de calor, tal lo adelantado, prácticamente cuantifica las fugas hacia el ambiente que se producen a través de las cubiertas transparentes, y su valor en este caso ($U_c = 2,22 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) es relativamente bajo.

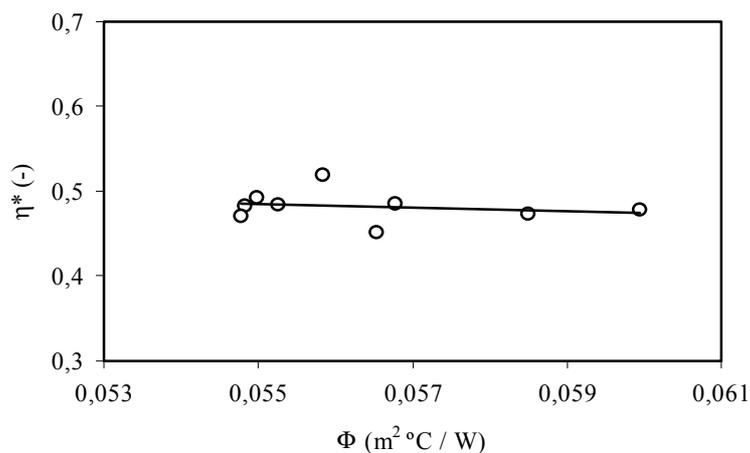


Figura 5. Curva característica del colector solar. Cálculos (O), regresión lineal(—).

IMPLEMENTACIÓN DE LA EXPERIENCIA

El Trabajo Práctico fue inicialmente realizado en el marco del curso de Fundamentos de la Ingeniería Química de la carrera de Ingeniería Química. En esta materia, correspondiente al ciclo intermedio de la carrera, se desarrollaban los temas : Ecuaciones de Balance y Fenómenos de Transferencia de cantidad de movimiento, energía y materia. Dada la modalidad de estos trabajos, denominados trabajos especiales, la experiencia fue realizada por un número limitado de alumnos que cursaron la asignatura entre los años 1997 y 1999.

Luego como se reformuló el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química, la citada asignatura desapareció. Los temas relacionados con energía, ahora se dictan en el curso de Transferencia de Energía y Operaciones, correspondiente al nuevo plan de estudios, en la cual se ha priorizado la realización de otros trabajos prácticos.

Se tiene programado implementar ahora el trabajo práctico en una asignatura relacionada con las Aplicaciones Térmicas y Químicas de la Energía Solar. Esta asignatura optativa, y será dictada para la carrera de Ingeniería Química. Para la implementación futura del trabajo se han planteado objetivos similares a los establecidos en los trabajos prácticos intensivos, de manera que el estudiante adquiera capacidades, aptitudes y actitudes no siempre contempladas en la enseñanza tradicional. Naturalmente, también se pretende repetir los buenos resultados obtenidos anteriormente en beneficio del aprendizaje y que se han volcado en el artículo de Albizzati y Rossetti (1998).

En el presente artículo se ha enfatizado sobre aspectos teóricos del modelado y la construcción de la red térmica en el colector solar, y en el uso de herramientas de cálculo, dado que la asignatura a dictar estará ya dentro del ciclo superior de la carrera de Ingeniería Química.

CONCLUSIONES

- El trabajo práctico desarrollado pone a los estudiantes en contacto con herramientas ingenieriles fundamentales, tal como balance de energía, modelado de equipos y cálculo computacional.
- La experiencia es una herramienta para concientizar sobre la potencialidad que presenta la radiación solar como fuente de energía térmica, y comprender los requerimientos para los materiales empleados en los equipos de conversión de la energía solar.
- Se capacita a los estudiantes en el manejo de instrumentos de medición (termocuplas, piranómetro y anemómetro), y en el posterior tratamiento de los datos experimentales mediante una planilla de cálculo pueden realizarse las aproximaciones polinómicas, la regresión lineal y las representaciones gráficas propuestas en el trabajo.
- Dada la variedad de condiciones operativas y ambientales que pueden presentarse en la práctica, se pueden posibilidad de diseñarse distintas experiencias, con el fin de determinar la influencia de las distintas variables sobre la eficiencia y los parámetros característicos del colector solar.

- Utilizando todos los datos experimentales recogidos en las experiencias realizadas bajo diversas condiciones, pueden obtenerse una única eficiencia óptica y un único coeficiente de pérdidas de energía representativo del comportamiento promedio del equipo.

NOMENCLATURA

A	área (m ²)	Subíndices	
C _p	calor específico (kJ / kg °C)	a	aire
h	coeficiente de transferencia de calor (W / m ² °C)	b	lecho
I	radiación solar (W / m ²)	C	colector
m	caudal másico (kg / s)	c	convección
M	masa (kg)	e	ambiente
Q _u	energía útil (kJ / s)	f	cubierta
t	tiempo (s, min)	i	entrada
T	temperatura (°C)	o	salida
U	coeficiente de pérdidas de calor (W / m ² °C)	r	radiación
z	largo del colector (cm)	1	cubierta inferior
		2	cubierta superior
Letras Griegas		Símbolos	
η	eficiencia térmica (-)	<>	promedio
η*	variable arbitraria(-)		
η _o	eficiencia óptica (-)		
Φ	función (m ² °C / W)		

REFERENCIAS

- Albizzati E. y Rossetti G. (1998). Equipos para la Enseñanza de los Fenómenos de Transferencia de Energía y de Conversión de la Radiación Solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 2, 2, 10.13 -10.16.
- Albizzati E. (2000) .Inclusión de Temas Relacionados con la Energía Solar en Cursos de las Carreras de Ingeniería. Proceeding of the Millennium Solar Forum 2000 ,International Solar Energy Society, 663-666.
- Duffie J. A. y Beckman, W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd. Ed., J. Wiley & Sons, New York.
- Incropera F. y De Witt D. (1990). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd. Ed., J. Wiley & Sons, New York.
- Kreider J.F. y Kreith, F. ,Eds. (1981) . Solar Energy Handbook, Mc Graw Hill, New York.
- Kudret Selçuk M. (1977). Solar Air Heat and their Applications, in Sayigh, A.A.M., Ed., Solar Energy Engineering, Academic Press, New York, Chap. 8.
- Mills A. F. (1995). Transferencia de Calor, Irwin, México DF.
- Ollis D. F. y Al-Ekabi, H. (1993). Photocatalytic Purification of Water and Air, Elsevier, Amsterdam.
- Perry R.H. y Green D.W., Eds (1999). Perry's Chemical Engineer's Handbook, 7th Ed., Mc Graw Hill, New York.
- Rossetti G., Albizzati, E. y Alfano, O. (1998). Modeling and Experimental Verification of a Flat-Plate Solar Photoreactor, Ind. & Eng. Chem. Research, 37 ,9, 3592.
- Wilkins, F. W. y Blake D. M. (1994) . Use Solar Energy to Drive Chemical Processes, Chem. Eng. Progr., 90 ,6, 41.

ABSTRACT: It is proposed a practical work to study the thermal performance of a solar collector for air heating. The equipment work in unsteady state. In order to analyze the device behavior experiences are accomplished where the inlet and outlet temperatures of air, the air velocity, the temperature in several points of the bed, and the incident solar radiation are measured. Then, the energy gain, the thermal efficiency and the characteristic parameters of the solar collector (optical yield and heat loss coefficient) are calculated. The practical work developed allows the students to get in touch with fundamental engineering tools, such as energy balance, heat transfer phenomena , equipment modeling and computing calculation. It is also important to emphasize that the experiences give students training in the handling of measurement instruments (thermocouples, piranometer and anemometer), and in the subsequent treatment of the experimental data by means of a spreadsheet.

KEYWORDS: Education - Engineering - Solar - Thermal.